

知識物件上傳表

計畫名稱：地熱溫泉能源多元開發關鍵技術研發計畫

上傳主題：高溫型地熱趨勢之材料腐蝕及選用

提報機構：財團法人金屬工業研究發展中心

提報時間：110年11月23日

與計畫相關	<input checked="" type="checkbox"/> 1.是 <input type="checkbox"/> 2. 否
國別	<input checked="" type="checkbox"/> 1.國內 <input type="checkbox"/> 2. 國外：國際
能源業務	<input type="checkbox"/> 1.能源政策(包含政策工具及碳交易、碳稅等) <input type="checkbox"/> 2.石油及瓦斯 <input type="checkbox"/> 3.電力及煤碳(包含電力供應、輸配、煤炭、核能等) <input checked="" type="checkbox"/> 4.新及再生能源 <input type="checkbox"/> 5.節約能源(包含工業、住商、運輸等部門) <input type="checkbox"/> 6.其他
能源領域	<input type="checkbox"/> 1.能源總體政策與法規 <input type="checkbox"/> 2.能源安全 <input type="checkbox"/> 3.能源供需 <input type="checkbox"/> 4.能源環境 <input type="checkbox"/> 5.能源價格 <input type="checkbox"/> 6.能源經濟 <input checked="" type="checkbox"/> 7.能源科技 <input type="checkbox"/> 8.能源產業 <input type="checkbox"/> 9.能源措施 <input type="checkbox"/> 10.能源推廣 <input type="checkbox"/> 11.能源統計 <input type="checkbox"/> 12.國際合作
決策知識類別	<input type="checkbox"/> 1.建言(策略、政策、措施、法規) <input checked="" type="checkbox"/> 2.評析(先進技術或方法、策略、政策、措施、法規) <input type="checkbox"/> 3.標竿及統計數據：技術或方法、產業、市場等趨勢分析 <input type="checkbox"/> 4.其他：
重點摘述	<p>隨著地熱能的開發和重要性日益增加，在材料的使用方面出現了一些腐蝕問題，這些問題影響了能源服務的有效性和質量，部分地熱流體的特性會導致用於發電的設備因腐蝕而損壞，流體內溶解的CO₂、H₂S、NH₃和氯離子可能會導致金屬材料被腐蝕而無法使用。</p> <p>然而，流體的化學成分、溫度和速度因地熱資源、電力系統的設計和生產週期而異，在使用過程中獲得的操作經驗和對真實地熱流體進行的實驗室研究構成了該地區材料選擇的基礎。在本文中，討論了地熱系統中出現的腐蝕類型的原因，並根據發現金屬和非金屬材料的環境條件對材料的行為進行了評估。</p>
詳細說明	<p>一、背景概況</p> <p>地熱能是一種恆定且獨立的可再生能源形式，對世界未來的能源平衡起著關鍵作用，由於地球大量的板塊活動及火山地熱，在世界各大洲都有大量深部地熱資源可用，可以幫助各國減少對能源進口的依賴，並在未來的能源結構中建立更廣泛的基礎。</p> <p>然而，儘管潛力巨大，傳統地熱能源規模對全球發電的總貢獻仍然相對較小，因此為求更大的地熱效益，未來地熱朝向高溫度/高深度的超臨界式開發(>373°C, 220 bar 時水呈現超臨界流體)，如圖1及圖2所示，以一個建造2口生產井的400°C 超高溫 EGS 地熱案場，甚至可抵上24口200°C EGS(增強型地熱系統)生產井產出的能量；到2050年，地熱發電預計一半以上應該來自 EGS，但該技術仍處於示範階段[1]。</p>

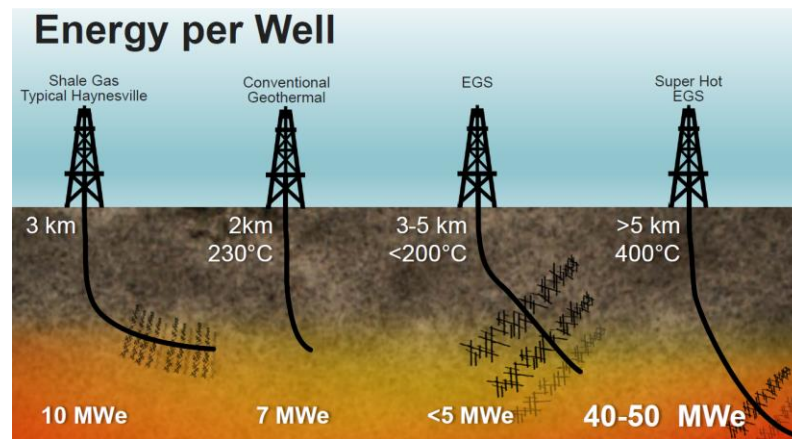


圖1 地熱井型態、深度與產出能量比較

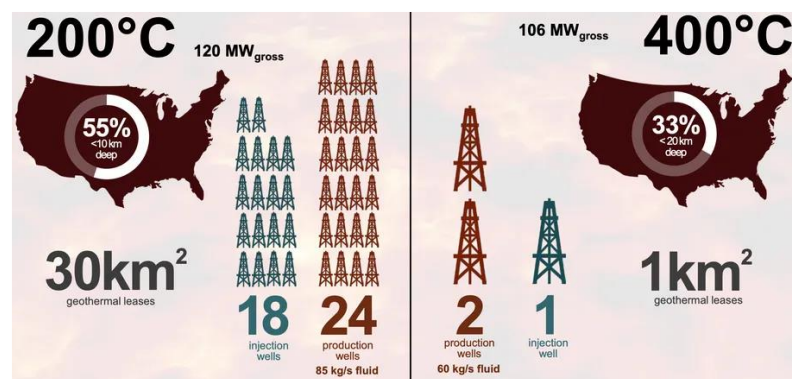


圖2 高溫地熱生產井產出能量比較

事實上，EGS 儲集層創建的具體技術要求仍然存在不確定性，迄今為止的操作經驗在大多數情況下僅以月而不是年為單位衡量。深度對於大型地熱發電來說是獲得足夠高的溫度的必要條件，如何鑽達如此深的目標帶來了資本和運營成本增加，以及開發風險增加的挑戰。最近的一項研究[3]審查了已在歐盟、日本、韓國、澳大利亞和美國應用的 18 個重要的 EGS 電廠和技術，得出的結論是選定案場之特徵仍然是決定 EGS 開發能否成功的關鍵因素。

超高溫度趨勢亦是開發深層地熱資源的必要條件，但至今從實施極為複雜的深層地熱項目中獲得的經驗，已經暴露出相當的技術和經濟挑戰、低於預期的性能和糟糕的公眾形象。並且，對預先存在的斷層進行刺激會帶來相關地震事件的風險。例如，韓國浦項市最近經歷了 5.5 級地震事件，這可能是與附近地熱電廠的水力增產活動有關[2]。

高深度地熱流體和不可冷凝氣體（如硫化氫 (H₂S) 和二氧化碳 (CO₂)、氯離子 (Cl⁻) 和氟化氫 (HF)）的侵蝕性，導致高溫/高壓地熱蒸汽中使用的建築與發電設備材料受到腐蝕。冰島北部 rafla 地區的 Icelandic Deep Drilling 井 (IDDP-1) 在 140 bar 壓力下流過 12 ks/s 的過熱蒸汽時，井口溫度為 452°C。僅這口井就可以產生 25-35 MWe，但由於極端高溫高酸條件，該廠目前無法運行。

因此，不僅迫切需要繼續研究 EGS 技術，而且還需要專門研究替代性的、更可持續的井體及材料設計，使深層地熱開發盡可能獨立於特定地點的儲層特徵，同時瞄準財務可行性提出的解決方案，找到更穩定的替代方案。

二、地熱腐蝕

1. 均勻腐蝕：

整個金屬表面均會發生均勻腐蝕，在地熱系統中，通常是由氯離子、銨離子或氫離子造成。

2. 點蝕：

在整個金屬表面因為腐蝕出現小凹坑後，常會集中深化腐蝕造成鈍化膜的破裂，此類凹坑的開始形成和加深的速度無法預測。

3. 裂縫腐蝕：

就生成形式而言，它類似於點蝕，但幾何形狀呈現長條裂縫狀，多是在設備生產或操作條件下金屬材料堆積層下發生的，起點和深度無法預測。

4. 應力腐蝕裂隙 (SCC)：

由於金屬材料中的氯離子和應力，這是一種危險的腐蝕類型。氧氣的存在和溫度的升高會增加腐蝕速率。

5. 硫應力腐蝕裂隙 (SSC)：

它是由於高強度鋼在含有硫化氫 (H_2S) 的潮濕環境中存在而發生的腐蝕類型。不同於應力腐蝕裂隙，在硫應力腐蝕裂隙中腐蝕速率隨著氧氣的存在和溫度升高而降低。此外，低pH值會增加腐蝕速率。

6. 氫脆化：

它的發生是低強度鋼在含有硫化氫的水溶液中，晶格原子空缺捕獲氫能力不足而發生裂隙，材料脆化而難以承擔外部施加應力。

7. 晶間腐蝕：

發生在金屬材料的晶界周圍或相鄰晶粒內的區域腐蝕，但它不影響晶粒結構，會使合金斷裂或失去強度，多因錯誤的熱處理導致這類腐蝕。

8. 加凡尼腐蝕：

加凡尼電偶腐蝕是由兩種不同金屬間存在不同極化電位造成電子流動引起的。通過偶極電位表可以了解材料的選用，然而，該表數值在化學系統和溫度的變化下會發生變化。

9. 疲勞腐蝕：

疲勞腐蝕是由於在腐蝕環境中週期性波動的應力而發生的，疲勞腐蝕極限則是給定條件下的最大應力。週期、應力和腐蝕的綜合影響比其他簡單的影響要大得多。

10. 流體腐蝕：

高速流體流經或攜帶顆粒撞擊固體材料而造成的磨損，受到這種腐蝕的金屬不會在其表面形成腐蝕產物，但會沿流動方向，產生肉眼可見的凹坑或波浪狀的圓圈，經常出現在渦輪葉片和具有兩相流動的領域中。

11. 合金分解：

地熱流體對合金成分的溶解。

12. 氣穴：

氣穴現象是由爆炸的蒸汽氣泡引起金屬表面的快速區域分解。

三、材料選擇

1. 金屬材料

1.1 低合金金屬

由於成本低且方便，低碳鋼似乎是一種合理的材料。另一方面，這種材料的安全使用取決於系統中的應用。各種現場試驗結果表明，在 pH 值大於 6、Cl 離子濃度小於 2% 的情況下，均勻腐蝕速率在 1-10 mpy 之間變化。地熱流體中，Cl 離子會引發局部腐蝕，硫化氫的存在會增加局部腐蝕的影響，環境中的少量氧氣也會加速均勻腐蝕的形成，從而引發點蝕和裂隙腐蝕的發生。

高流速和流體中積累的固體顆粒會導致侵蝕腐蝕，碳鋼材料的最佳流速為 5-7 fps。在應力條件水環境下經受硫化氫的鋼材中可以看到硫應力斷裂，隨著溫度的升高、應力的減小、強度的降低以及硫濃度的降低和 pH 值的增加而增加。此外，低強度鋼在含有硫化氫的水溶液中可能會發生氫脆化。

1.2 不銹鋼

不銹鋼材料降低了地熱流體環境中形成均勻腐蝕的可能性，但是，可能會出現更嚴重的腐蝕問題。當與地熱領域的精密設備一起使用時，不銹鋼的裂隙腐蝕是一個嚴重的問題，環境中氯離子濃度的增加導致影響局部腐蝕增加，溫度升高會增加凹坑電位。

不銹鋼抗點蝕和裂隙腐蝕的能力取決於其鉻和鉬含量，這兩種元素增加了不銹鋼在無氧環境中的抵抗力。應力腐蝕斷裂取決於 Cl 離子、氧濃度、pH 值、溫度、張力和合金成分，含鎳合金會受到應力腐蝕的影響，添加 Mo 和二氧化矽可提高抗應力腐蝕。含鐵不銹鋼會受到硫應力斷裂的影響，但奧氏體不銹鋼不會，低強度鋼更容易受到硫應力斷裂。

1.3 鈦及鈦合金：

地熱流體試驗中顯示鈦材料的腐蝕率一般低於 0.3 mpy，溫度和 Cl 離子濃度的增加不會加速腐蝕速率，且大約 30 fps 的流速不會影響全面腐蝕。此外，鈦可抵抗氣蝕和衝擊損壞，在高溫和 Cl 離子濃度高於 10 % 時才

會觀察到點蝕和開裂腐蝕。鈦比其他金屬更具陰極性，如果鈦面積大於配對金屬，配對金屬會發生嚴重的電偶腐蝕。鈦可能會吸收氫並導致氫脆。假設鈦合金在 Cl 離子濃度高於 3% 時容易發生應力腐蝕斷裂。

此外，當有氧氣進入系統時，鈦及鈦合金是首選的材料，因為含有氧氣和熱 Cl 離子的地熱流體會導致不銹鋼和鎳基合金的局部腐蝕破裂。在這些情況下，關鍵的地方可以使用鈦合金作為材料；井口閥門、壓力表、管道和防噴器。

如果含 Cl 的熱地熱流體溶解固體物質的量大於 100,000 ppm，pH 值小於 4，井筒溫度大於 230°C，則輸送地熱流體首選鈦管。這種材料的使用壽命在 15 年以上，與低合金鋼相比，它沒有可再生成本，此外，它們不會形成含有放射性和重金屬的腐蝕和積累產物。此外，它們降低了油井堵塞和油井損壞的風險，並防止了富含鐵的矽酸鹽堆積物堵塞井管。

1.4 鎳合金：

對於高溫地熱流體，適合使用 Ni-Cr-Mo 合金作為材料。特別是 Inconel-625 和 Hastelloy C-256 對腐蝕的腐蝕非常強。代替鉬，含有鐵元素的類似合金可用於某些應用，因為機械性能比不銹鋼堅固得多。一些鎳合金在硫化氫存在下缺乏抗應力硫開裂或氫脆的能力。

2 非金屬材料

在一些特殊的地熱作業和鑽井作業中需要使用非金屬材料，例如彈性體的使用。此外，通常具有很強的耐腐蝕性，初始投資成本低於金屬和合金，然而，它們在傳熱設備中沒有用處。

地熱領域使用的一些非金屬材料的規格及性能如下：

2.1 混凝土和聚合物成分：

聚合物混凝土的耐久性取決於所有成分，包括砂石、沙子和波特蘭水泥，可以承受超過 218 °C 的地熱水和蒸汽。

2.2 水泥：

C-S 水泥和磷酸鹽玻璃水泥被開發用作為潛在的膠結材料與塗層材料。

2.3 彈性體：

在鑽井作業中對彈性體作為連接部件的研究一直在繼續，氟基彈性體作為管道中的連接部件表現出最佳性能，乙烯-丙烯-二烯三元共聚物在大多數系統中用作閥門和 O 形圈的密封件。

2.4 纖維增強材料：

氯化聚氯乙烯（CPVC）和玻璃纖維增強塑料（FRP）的使用增加，因其高耐腐蝕性和低成本，可在腐蝕性地熱水輸送管線中安全使用。此外，由於在高水垢生成環境中，低成本 FRP 管道光滑的表面減少了阻垢劑的使用，其在高壓 (>200 bar) 下的機械性能和在高溫 (>130 °C) 下的耐用性，在最近的研究中得到了改善，但易折斷和脆化的特性尚待加強。

四、結論

鈦、鉻鎳鐵合金和哈氏合金 C-276 Ni-Cr-Mo 合金適合高溫地熱使用。為了在地熱產業中繼續使用鋼、不銹鋼等材料，必須採取預防措施。

混凝土高分子化合物、水泥和纖維增強塑料等非金屬材料因其高耐腐蝕性和合理的成本而更加有用。

參考文獻

- [1] Chamorro, C.R., García-Cuesta, J.L., Mondéjar, M.E. and Pérez-Madrazo, A., Enhanced geothermal systems in Europe: An estimation and comparison of the technical and sustainable potentials, Energy, Volume 65, 2014, Pages 250-263, ISSN 0360-5442
- [2] Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A.P., Manconi, A., López-Comino, J.A., Clinton, J.F., Westaway, R., Cauzzi, C., Dahm, T. and Wiemer, S., The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea, Science, 2018
- [3] Lu, S.M., A global review of enhanced geothermal system (EGS), Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, ISSN 1364-0321
- [4] M.F. Conover, P.F. Ellis, A.M. Curzon, "Material selection Guidelines for Geothermal System" Radian Corporation, Austin, Texas, 1982
- [5] N. Sanada, Y. Kurata, H. Najo, H.S. Kim, J. Ikeuchi, K.A. Lichti "IEA Deep Geothermal Resources Subtask C: Materials Progress with a database for Materials in Deep and Acidic Geothermal Wells" Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000

- 註：1.請計畫執行單位上傳提供較具策略性的知識物件，不限計畫執行有關內容。
2.請計畫執行單位每季更新與上傳一次，另有新增政策建議可隨時上傳。
3.文字精要具體，量化數據盡量輔以圖表說明。